doi:10.13866/j.azr.2019.02.07

新疆有无人为干扰下土壤盐分估算的比较①

王　宁[1]，　熊黑钢[2]，　马利芳[1]，　叶红云[1]，　张　芳[1]
（1. 新疆大学资源与环境科学学院,绿洲生态教育部重点实验室,新疆 乌鲁木齐　830046;
2. 北京联合大学应用文理学院,北京　100083）

摘　要: 以新疆有无人为干扰土壤的实测光谱为数据源,利用去包络线法提取其吸收特征和敏感波段,建立了多种基于去包络线法的土壤盐分估算的一元、多元线性回归模型。结果表明:① 去包络线法能明显增强土壤光谱在 400 ~ 610 nm 和 610 ~ 800 nm 波段的吸收特征;② 有/无人为干扰区土壤盐分含量与去包络线一阶微分的相关性较好,敏感波段在无人为干扰区集中于可见光区(400 ~ 800 nm),而人为干扰区为可见光 - 近红外区(400 ~ 2 400 nm);③ 土壤盐分值预测模型精度从高到低在有/无人为干扰区基本上是:去包络线 6 个吸收特征模型 > 去包络线和去包络线一阶微分敏感波段模型 > 去包络线 3 个吸收特征模型 > 单个吸收特征模型。有/无人为干扰区最佳预测模型的 R^2 分别为 0.86 和 0.92。无人干扰区最优模型(6 个吸收特征)的相对分析误差(RPD)达到了 3.06,大于 3,说明其能极好并且稳定的预测此区土壤盐分值。

关键词: 人为干扰;去包络线法;土壤盐分;高光谱;新疆

土壤盐渍化是干旱半干旱地区农业发展的主要障碍因子,人为干扰活动又是导致次生盐渍化的直接原因。因此,准确掌握人为干扰下的土壤盐分信息,对于治理盐渍土、防止土壤次生盐渍化的发生及实现干旱区的可持续发展具有重要意义[1-2]。

光谱分析技术是综合光谱学、化学计量学和计算机应用等学科的现代分析技术,与传统分析技术相比具有快速、无损、无污染的优点[3]。当前,高光谱是对土壤盐渍化遥感监测的理想手段之一[4]。国内外学者利用高光谱数据,以不同区域的土壤盐分为对象展开了研究。Abrol、Dehaan 和 Christian 等[5-7]分别分析了土壤高光谱的特征,并找到了盐分的光谱敏感波段。刘迁迁、王芳芳等[8-9]分别对新疆不同地区的土壤盐分进行了定量分析。李晓明、段鹏程等[10-11]利用土壤高光谱盐分敏感波段对盐分含量进行了反演,发现光谱的不同变换形式对盐分预测有不同影响。彭杰等[12]利用光谱去包络线法对新疆南部土壤盐渍化预测的效果较好。对于受到人类不同干扰的土壤盐分精准估算用何种去包络线法更为合适,是当前需要重点探讨的问题之一。

本研究采用去包络线法提取有无人为干扰土壤的高光谱敏感波段和吸收特征,建立了多种基于去包络线法的土壤盐分估算模型并检验其预测效果,比较其对提取不同干扰程度下土壤盐渍化信息的有效性,提出不同人为干扰下土壤盐渍化的适宜快速光谱监测模型。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区在新疆天山北麓阜康境内,地处山前冲积、洪积扇下缘,地势较为平坦,土壤环境背景基本一致。原始地表土壤质地为沙土,地表盐渍化现象严重,在西北干旱区具有代表性。地表植被覆盖度较低,主要为灌木、半灌木。

随着社会经济快速发展和人口的增加,人类对该区土地进行了不同方式的利用,对土壤造成不同程度的干扰,因此将研究区按人类活动干扰程度的大小,分为无人干扰区和人为干扰区。无人干扰区距人类活动区较远,地表基本保持原始风貌,植被覆盖度较高,部分地区有成片梭梭林(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge),伴生植物种有红柳(*Tamarix juniperina* Lour.)、盐爪爪(*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.)等。由于较少受到人类干扰,

① **收稿日期:** 2018 - 06 - 19;　**修订日期:** 2018 - 10 - 29
基金项目: 国家自然科学基金(41671198,41761041);北京市教委创新团队(IDHT20180515)
作者简介: 王宁(1993 -),女,硕士,主要研究方向为干旱区资源环境与遥感分析. E-mail: 624405709@qq.com
通讯作者: 熊黑钢. E-mail: heigang@buu.edu

土壤表面常见黑色生物结皮,发育良好,地衣、苔藓结皮对土壤表面起着稳定作用[13]。人为干扰区靠近新疆生产建设兵团102团,北部为弃耕荒地,植被覆盖度较低仅有猪毛菜或琵琶柴等矮灌木存活,南部为人工林场,种有榆树(*Ulmus pumila* L.)、枸杞(*Lycium chinense* Mill.)等,采取滴灌措施。由于两区距离较近,仅被人工设施分离,因此本研究土壤的成土母质、日照、气温、降水等自然条件一致,土壤盐分主要受人类活动干扰的影响。

1.2 样品采集与处理

采用网格采样法分别在无/有人为干扰区由南向北布设5~6条相距800~1 000 m的采样线,每条线上选取5个距离200~500 m的能代表周围环境背景的样点,并使用GPS定位(图1)。两区共55个样点,无人为干扰区25个,人为干扰区30个。因干旱区土壤水分蒸发强烈,土壤中的盐分易随水分迁移到地表,故选取能够反映该点环境平均状况的土壤表层(0~10 cm),用梅花桩采样法采集每个样点土壤样品1 kg,混合均匀后装入密封袋内并标记编号。

对55个土壤样品经清除小石块及植物根系等杂物后,于实验室内自然阴干,随后对阴干样品过2 mm筛,将过筛后的土壤样品置于新样品袋中,标记相应编号送至中国科学院新疆生态与地理研究所中心试验室进行土壤盐分测定。

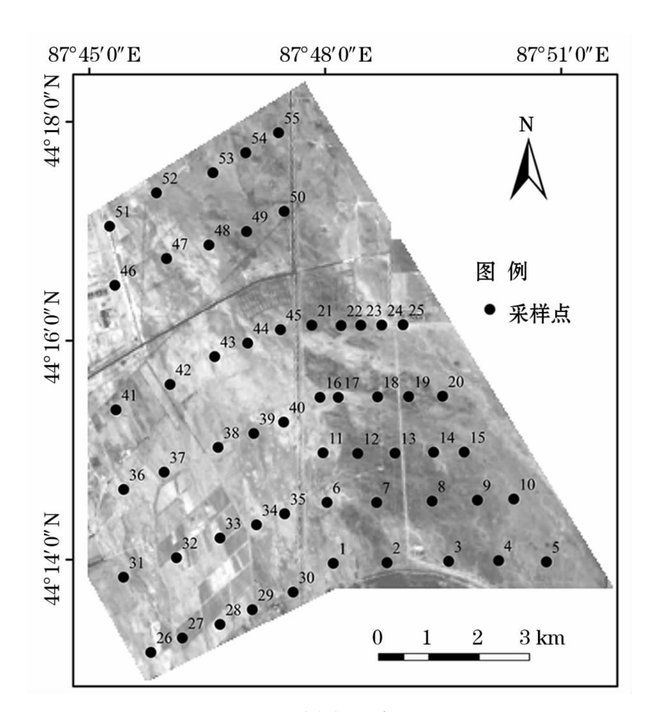


图1 样点示意图

Fig.1 Distribution of soil sampling sites

1.3 样品统计特征

土壤样品含盐量较高且盐分变化范围较大(表1),多为中度(土壤盐分6~10 g·kg^{-1})、重度盐渍化土(土壤盐分10~20 g·kg^{-1})、盐土(土壤盐分>20 g·kg^{-1})[14]。从均值来看,土壤盐分含量人为干扰区高于无人为干扰区,这可能是由于人类活动使地下水位抬升,土壤水中的盐分更容易通过毛细管上升至地表,使盐分表聚,造成了人为干扰区盐分含量较高[15]。两区样品数据的变异系数较大,为42.26%~58.06%,变异性为中等变异(10%~100%),表明样本数据离散程度较高,这有利于模型的构建,所建模型也更具普适性。同时,无论是建模集、检验集还是全部样本,人为干扰区的样品标准差和变异系数均大于无人干扰区。

表1 土壤含盐量统计特征

Tab.1 Statistic characteristics of soil salt content /(g·kg^{-1})

	无人为干扰区			人为干扰区		
	建模集(n=15)	检验集(n=10)	全部样本(n=25)	建模集(n=15)	检验集(n=10)	全部样本(n=25)
最小值	4.20	5.15	4.20	3.50	1.58	1.58
最大值	30.08	27.13	30.08	41.63	36.42	41.63
均值	16.33	15.48	15.99	21.20	19.12	20.51
标准差	7.54	6.54	7.03	10.83	11.10	10.78
变异系数/%	46.17	42.26	43.95	51.09	58.06	52.54

注:n指代样品数。

1.4 光谱采集

土壤光谱数据采用美国ASD公司的FieldSpec 3型光谱仪在野外实地测得,波长为350~2 500 nm。采样时间为2017年5月11—24日的11:00—16:00(当地时间),天气晴朗少云,基本无风。光谱测定时,传感器探头位于土壤表面垂直上方15 cm处,采用25°视场角探头,每次采样前先进行白板校正以去除暗电流的影响。每个样点的光谱来自采样点周围1 m内土壤背景相近的5处土壤,每处采集1次,每次10条光谱,共50条。

1.5 光谱预处理及吸收特征参数提取

采用ASD View Spec Pro对光谱预处理,运用Origin Pro 9.1对光谱反射率进行Savitaky-Golay平滑去噪处理。由于土壤反射光谱前段350~399 nm和后段2 401~2 500 nm的噪声较大,因此剔除这两段光谱。此外,受到水分吸收带的影响,在1 400 nm、1 900 nm和2 200 nm处的波动也较大[16],因此

剔除反射率值波动剧烈的 1 359 ~ 1 410 nm、1 820 ~ 1 942 nm 和 2 197 ~ 2 210 nm 波段。利用 Envi 5.1 进行去包络线处理后再用 Origin Pro 9.1 对其进行微分处理。

去包络线变换后,提取如下几个典型吸收特征:最大吸收深度、吸收峰总面积和最大吸收宽度(图 2)用以建模[17]。

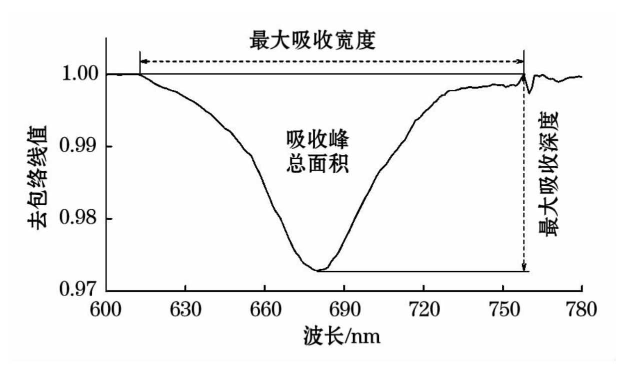


图 2　光谱吸收峰吸收特征示意图

Fig. 2　Schematic diagram of spectral absorption features

最大吸收深度(D)即吸收峰内去包络线最低点到归一化包络线间的垂直距离。公式为:

$$D = 1 - \rho_{cr}$$

式中:ρ_{cr}为吸收峰内去包络线最低点光谱去包络线值。

吸收峰总面积(A)即去包络线值积分,是指吸收波长范围内光谱曲线与去包络线所围成的面积大小。公式为:

$$A = \int_{w_1}^{w_2} 1 - f(w)\,dw$$

式中:$f(w)$即为光谱曲线;w_1、w_2 为吸收峰两肩波长值。

最大吸收宽度(W)即为吸收峰两肩之间的距离。公式为:

$$W = w_2 - w_1$$

1.6　模型构建与精度评价

采用 Kennard-Stone 法将两种人为干扰的样品盐分数据划分为建模集和检验集,无人为干扰区的建模集样本数为 15,检验集为 10,人为干扰区的个数分别是 20 和 10(表 1)。

建模方法采用一元线性回归和多元线性回归,模型精度采用决定系数(R^2)、均方根误差(root mean square error, *RMSE*),相对分析误差(relative percent deviation, *RPD*) 3 种指标来评价,其计算公式如下。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_p - \bar{x}^2)}{\sum_{i=1}^{n}(x_0 - \bar{x}^2)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_0 - x_p)^2}$$

$$RPD = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_0 - \bar{x})^2}}{RMSE}$$

式中:n 表示样本个数;x_p 表示模型预测值;x_0 表示实测值;$\bar{x}$ 表示样品平均值。

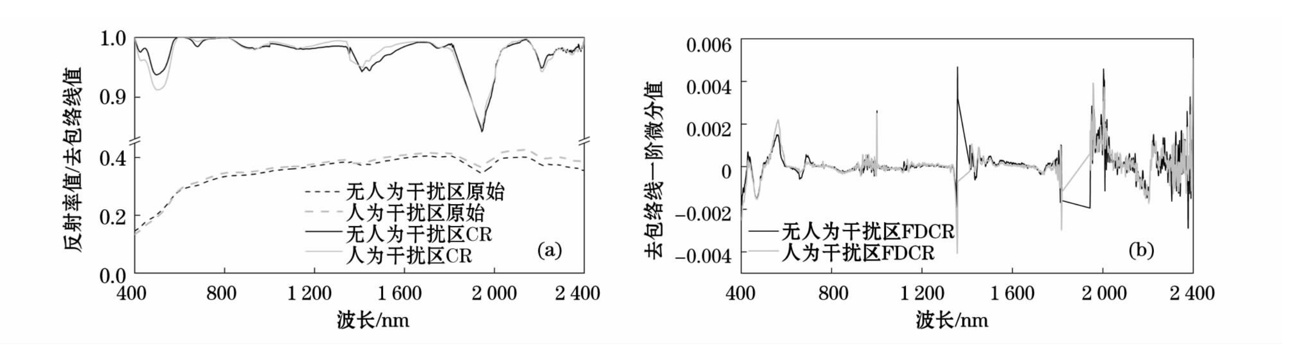
R^2 反映预测值解释实测值变化的程度,*RMSE* 用来检验模型模拟值和实测值的符合度。*RPD* 用来验证模型的稳定性和预测能力。若 R^2 越大,*RMSE* 越小,说明模型精度越高。此外,当 $1.5 \leq RPD < 2.0$ 时,表明模型只能对样品高含量与低含量进行粗略估计,$2.0 \leq RPD < 2.5$ 时,表明模型具有较好的定量预测能力;$2.5 \leq RPD < 3.0$ 时,模型具有很好的预测能力;$RPD \geq 3.0$ 时,分析模型具有极好的预测能力[18]。

2　结果分析

2.1　有无人为干扰下土壤高光谱特征

分别平均无人为干扰区、人为干扰区的光谱后,得到 2 条原始反射率曲线(图 3a)。从图中可以看出,两区反射率曲线走势基本一致,在可见光范围内 580 nm 处有交叉节点,节点前无人为干扰区土壤反射率高于人为干扰区,因为无人为干扰区盐分均值低于人为干扰区,表现出盐分低反射率高的规律。而节点之后,人为干扰区的反射率较无人为干扰区的高,呈现出盐分高反射率高的特征,且随着波长的增加,两区反射率值差异随之增大。另外,曲线在 1 416 nm、1 947 nm 和 2 216 nm 波段处有明显的吸收峰。

两区光谱的去包络线(CR)曲线(图 3a)中 1 416 nm、1 947 nm 和 2 216 nm 波段靠近水分吸收带处的吸收特征得到加强,变得尖锐且明显。而可见光范围内,两区在 400 ~ 610 nm 和 610 ~ 800 nm 波段处从原始光谱反射率曲线中很难发现的微弱吸收特征得到放大,且 CR 值差异较大。这表明 CR 法在可见光范围内对土壤光谱的反射和吸收特征放大效果较好,尤其是突出了不同人为干扰下土壤光谱的吸收差异,因此可利用此处的差异分析有无人为干扰的土壤盐分值。



注:CR 表示去包络线,FDCR 表示去包络线一阶微分。下同。

图 3　有无干扰下土壤原始光谱反射率去包络线曲线(a)和去包络线一阶微分(b)

Fig. 3　Spectral curves and continuum removal (a) and continuum removal first－order differential (b) of soils under different intensities of human disturbance

两区光谱去包络线经一阶微分(FDCR)变换之后的曲线(图 3b)在大部分波段都较接近,即 FDCR 值差异不大。400 ~ 800 nm 内有几处较明显的差异,分别为 430 nm、572 nm、664 nm 和 692 nm,而到近红外波段范围内,仅有 1 356 nm 和 2 400 nm 附近有所区分。

将 CR 差异明显的 2 个吸收峰放大得到,400 ~ 610 nm 波段的吸收峰较平滑(图 4a),CR 值在无人为干扰区的最小值为 0.937(498 nm),人为干扰区为 0.912(505 nm)。此波段无人为干扰区的 CR 值大于人为干扰区,即吸收深度和吸收面积均是无人为干扰区较小,又由于人为干扰区土壤盐分值高于无人干扰区,因此具有随着盐分的增加而增大的吸收特征。

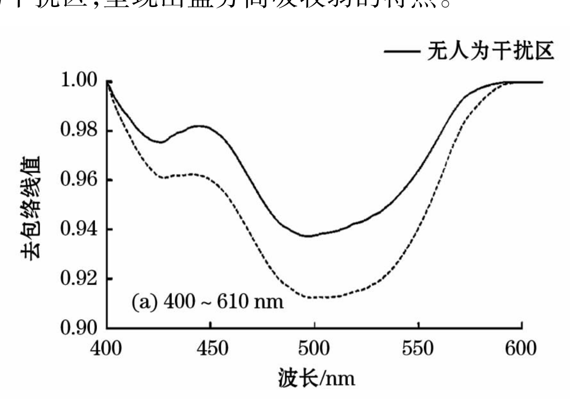
而到红光附近(610 ~ 800 nm)吸收峰则较尖锐突出(图 4b),尤其无人为干扰区的 CR 值在 681 nm 波段处达到了 0.985,比人为干扰区在 683 nm 处的最低值 0.993 低 0.012。与前一个吸收峰的吸收规律相反,此波段的光谱 CR 值是无人为干扰区高于人为干扰区,呈现出盐分高吸收弱的特点。

而到红光附近(610 ~ 800 nm)吸收峰则较尖锐突出(图 4b),尤其无人为干扰区的 CR 值在 681 nm 波段处达到了 0.985,比人为干扰区在 683 nm 处的最低值 0.993 低 0.012。与前一个吸收峰的吸收规律相反,此波段的光谱 CR 值是无人为干扰区高于人为干扰区,呈现出盐分高吸收弱的特点。

2.2　有无人为干扰下土壤含盐量与高光谱的相关性分析

无人为干扰区土壤含盐量与 CR 在 599 ~ 711 nm、1 358 nm、1 817 ~ 1 992 nm、2 288 ~ 2 313 nm、2 354 nm 和 2 387 nm 波段处为正相关,其余为负相关(图 5a)。最大相关系数分别在 677 nm、2 229 nm 波段,为 0.62 和 0.69。此区土壤盐分含量与 FDCR 的相关性较为复杂,正负相间,缺乏连续性,但由于微分处理能够将曲线中一些隐晦的信息放大,使得许多波段的相关性明显增强。657 nm、664 nm 和 693 nm 处的相关系数值排在前 3 位,最大值达到 －0.70,因此反映出无人为干扰区土壤光谱 FDCR 的敏感波段基本处在可见光范围内。

人为干扰区的 CR 与盐分含量的相关性波动较



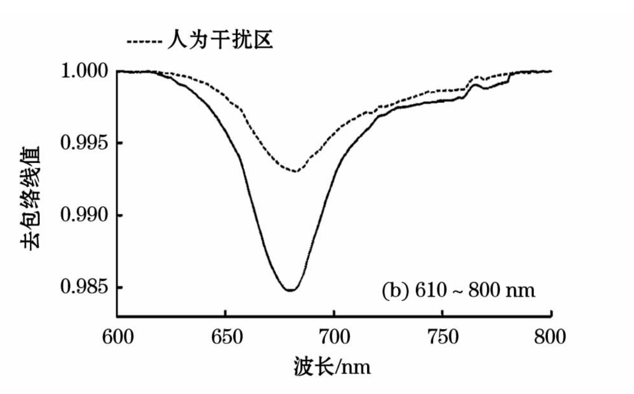


图 4　有无人为干扰区土壤光谱在不同波段的去包络线值

Fig. 4　Values of continuum removal in different bands under different intensities of human disturbance

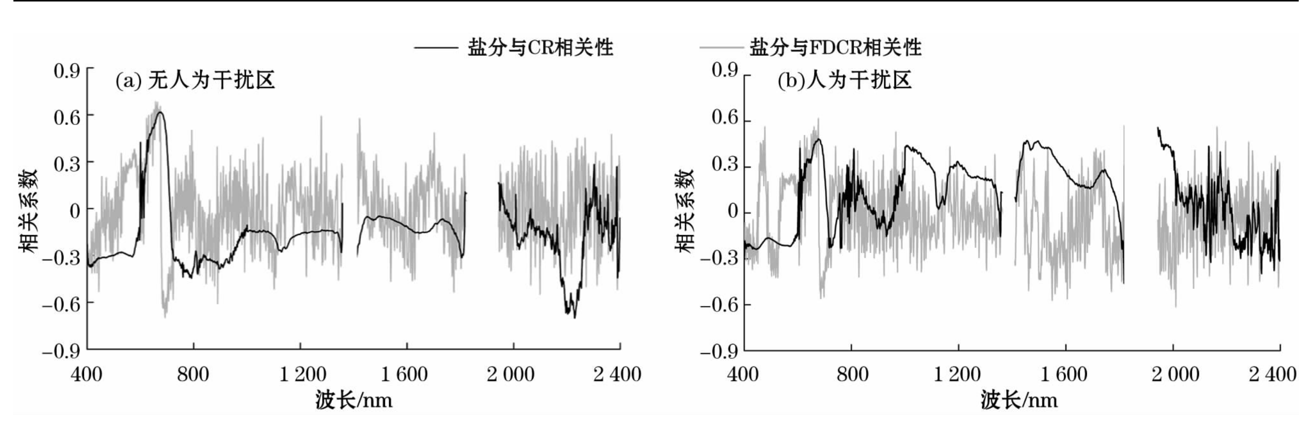


图 5　有无人为干扰下土壤含盐量与光谱去包络线及其一阶微分的相关性

Fig. 5　Correlation between soil salt content and continuum removal and its first－order differential under different intensities of human disturbance

大(图 5b)。正相关的波段变多,且相关系数也更高。可见光、近红外两部分内的相关系数最大值分别在 678 nm 和 1 944 nm 波段取得,为 0.49 和 0.56。与无人为干扰区类似,CR 通过一阶微分处理后与盐分的相关系数有明显提高,人为干扰使得土壤光谱 FDCR 的敏感波段在可见光－近红外波段内均有分布。最大相关系数在 677 nm、2 010 nm 和 1 549 nm处,分别为 0.62、－0.61 和－0.58,比 CR 与盐分的最大相关系数提高了 6%。

2.3　有无人为干扰土壤光谱 CR 和 FDCR 的敏感波段选取

人为干扰使土壤盐分含量产生变化,因此有无人为干扰土壤光谱特征出现差异,导致有无人为干扰土壤光谱敏感波段有所不同。根据显著(P = 0.01)且相关系数大的原则,分别选取不同人为干扰土壤光谱 CR、FDCR 的敏感波段。由于在下述提取 CR 吸收特征时是在 2 个波段共提取 6 个吸收特征,为了方便对比模型精度,敏感波段也选择 6 个。

在无人为干扰区 CR 与盐分相关系数通过 0.01 水平显著性检验的 2 个波段处各选择 3 个敏感波段,644～694 nm 波段内选 653 nm、668 nm 和 677 nm,2 190～2 246 nm 内为 2 229 nm、2 230 nm 和 2 244 nm。由于 FDCR 的敏感波段多分布在可见光范围内,因此在可见光范围内选取 657 nm、664 nm、675 nm、692 nm、693 nm 和 699 nm。

人为干扰区 CR 的敏感波段选取相关系数排在前列的 678 nm、679 nm、682 nm、686 nm、1 944 nm和 1 949 nm 波段。FDCR 的敏感波段则分别为 477 nm、661 nm、676 nm、677 nm、1 549 nm 和 2 010 nm。

2.4　土壤含盐量高光谱定量反演模型的构建与验证

2.4.1　基于 CR 及 FDCR 敏感波段的估算模型

为了考查 CR 及 FDCR 敏感波段建模对有无人为干扰土壤盐分的预测效果,分别选取 CR 和 FDCR 的敏感波段对盐分含量构建多元线性模型(表 2)。以 CR 敏感波段为自变量的模型中,无人为干扰区模型精度优于人为干扰区,其 R^2 和 *RMSE* 分别为 0.57 和 4.79,说明 CR 法对无人为干扰区的土壤光谱信息放大效果较好。

表 2　有无人为干扰下光谱去包络线及其一阶微分敏感波段模型

Tab. 2　Inversion models for soil salt content on sensitive bands of continuum removal and its first-order differential under different intensities of human disturbance

	无人干扰区		人为干扰区	
	R^2	*RMSE*	R^2	*RMSE*
CR	0.57	4.79	0.46	7.74
FDCR	0.71	3.94	0.67	4.10

注:R^2 表示决定系数,*RMSE* 表示均方根误差。下同。

光谱去包络线经一阶微分变换后,利用其敏感波段所建模型精度有较大的提高,尤其人为干扰区,R^2 提高了 0.21,*RMSE* 降低了 3.64。这说明微分处理对于人为干扰区土壤的敏感性较强,能够放大原本的曲线信息,提高一些波段的相关性。虽然人为干扰区土壤受到人类翻犁、浇水、施肥等干扰后其物理和化学性质都有所变化,使得土壤光谱也变得更加复杂,但一阶微分能削减这些变化因素的影响,从而提高光谱与盐分的相关性。因此去包络线一阶微分变换对于提高人为干扰土壤的含盐量预测模型精度具有关键作用。

2.4.2 基于 CR 吸收特征的估算模型 计算出每个土样光谱去包络线在 400～610 nm 和 610～800 nm 两个波段的最大吸收深度、吸收面积和最大吸收宽度。先以每种吸收特征参数作为单一自变量构建盐分拟合的一元一次线性模型，然后把上述 2 个波段内每个波段的 3 个吸收特征综合起来进行建模，最后将 2 个波段内共 6 种吸收特征参数一起作为自变量建立多元线性模型来预测盐分含量（表 3）。

单因素模型中，无论是在哪个区哪个波段，吸收面积和吸收深度的 R^2 均大于吸收宽度的 R^2，*RMSE* 则相反。其中，以无人为干扰区 400～610 nm 波段的吸收面积为自变量的模型精度最高，R^2 达到 0.72，其次是此区同波段的吸收深度模型，R^2 为 0.70，随后是人为干扰区 400～610 nm 波段的吸收深度、吸收面积模型，R^2 分别为 0.65，0.64。总体来看，除人为干扰区的吸收深度模型外，不同程度人为干扰下的土壤盐分反演模型均是 400～610 nm 波段的优于 610～800 nm 波段。

多因素建模中，对比 2 波段的综合吸收特征模型发现，有无人为干扰区均是 400～610 nm 波段的模型精度高于 610～800 nm 波段。但 400～610 nm 波段的模型是无人为干扰区优于人为干扰区，而 610～800 nm 波段的则相反，说明不同人为干扰土壤光谱在两波段内的吸收特征响应有所不同。2 波段 6 个吸收特征综合建模无人干扰区精度较高，R^2 达到 0.85，相比单因素建模有显著提高。说明吸收深度、面积和宽度仅能部分体现光谱的吸收特征，不够全面，而综合 2 波段共 6 种吸收特征则能较好地反映出土壤的光谱吸收状况。

2.4.3 模型的验证与最佳预测模型选择 利用独立于建模样本的检验样本对敏感波段模型和吸收特征模型进行对比验证，以挑选出最佳预测模型（表 4）。

表 3 有无人为干扰下盐分含量吸收特征参数模型

Tab. 3 Inversion models for soil salt content based on spectral absorption index under different intensities of human disturbance

自变量			无人为干扰区		人为干扰区	
		光谱吸收参数	R^2	*RMSE*	R^2	*RMSE*
单因素	400～610 nm	吸收深度	0.70	3.98	0.65	6.19
		吸收面积	0.72	3.63	0.64	6.31
		吸收宽度	0.46	5.34	0.30	8.78
	610～800 nm	吸收深度	0.44	5.43	0.46	7.74
		吸收面积	0.52	5.05	0.45	7.77
		吸收宽度	0.33	5.95	0.34	8.53
多因素	400～610 nm	3 个吸收特征	0.77	3.51	0.68	5.98
	610～800 nm	3 个吸收特征	0.50	5.01	0.53	4.97
	2 波段	6 个吸收特征	0.85	3.01	0.79	4.13

表 4 不同模型预测土壤盐分效果

Tab. 4 Soil salt contents predicted by different models

模型	自变量		无人为干扰区			人为干扰区		
			R^2	*RMSE*	*RPD*	R^2	*RMSE*	*RPD*
敏感波段	CR		0.81	2.56	2.06	0.80	4.23	2.11
	FDCR		0.76	3.03	1.94	0.81	2.12	2.55
吸收特征	400～610 nm	吸收深度	0.62	3.81	1.88	0.40	8.13	0.82
		吸收面积	0.53	4.24	1.07	0.27	9.00	0.78
		吸收宽度	0.20	5.55	0.50	0.67	6.06	1.72
	610～800 nm	吸收深度	0.46	4.54	0.93	0.68	4.98	1.85
		吸收面积	0.40	4.82	0.81	0.33	8.65	0.70
		吸收宽度	0.27	5.30	0.61	0.18	10.10	0.30
	400～610 nm	3 个吸收特征	0.78	4.58	2.76	0.62	3.79	1.30
	610～800 nm	3 个吸收特征	0.47	4.53	0.93	0.60	5.78	1.52
	2 波段	6 个吸收特征	0.92	1.78	3.06	0.86	2.11	2.93

注：*RPD* 表示相对分析误差。

在所有模型中,6 种吸收特征共同作为自变量建立的模型精度高于其余模型,有、无人为干扰区的 R^2 分别达到了 0.86 和 0.92。其中,后者模型精度最高 *RMSE* 值仅为 1.78,是所有模型中最小的,*RPD* 值为 3.06,达到所有模型中的最高值,且大于 3,这表明利用吸收特征联合对无人干扰土壤盐分进行预测具有稳定且极好的效果。人为干扰区以 6 种吸收特征为自变量建立的多元线性模型 *RPD* 值 2.93 (>2.5),即能够很好地预测人为干扰下的土壤含盐量。

除了以上两个模型,利用 CR、FDCR 建立的预测模型精度也相对较高,其 R^2 在有/无人为干扰区分别达到 0.81、0.76 和 0.80、0.81,*RPD* 分别达到 2.06、1.94 和 2.11、2.05,表明光谱变换的敏感波段建模虽然不是最佳模型,但其稳定性好,也能够较好的对有无人为干扰的土壤盐分进行预测,尤其人为干扰区的敏感波段模型 *RPD* 值都大于 2。2 波段的 3 个吸收特征分别综合的模型仅无人干扰区 400 ~ 610 nm 波段的预测效果较好,*RPD* >2。而利用一种吸收特征建立的模型中,只有无人为干扰区的 400 ~610 nm 波段的吸收深度模型(R^2 和 *RPD* 分别为 0.62 和 1.88),以及人为干扰区的 400 ~610 nm 波段的吸收宽度模型(R^2 为 0.67,*RPD* 为 1.72)和 610 ~ 800 nm 波段的吸收深度模型(R^2 达到了 0.68,*RPD* 为 1.85)的 *RPD* >1.5,能粗略估计盐分含量,其余模型则较差。

虽然利用基于 CR 的敏感波段和吸收特征建立的多元线性模型都能较好甚至极好地预测有无人为干扰土壤的含盐量,但 6 种吸收特征联合建立的模型在两区内对模型精度提高效果最显著,因此,无论有无人为干扰,最佳模型都是利用 CR 提取出的吸收特征建立的多元线性模型。

3　结 论

本文利用 CR 提取出的敏感波段和吸收特征建立了有无人为干扰土壤盐分含量的高光谱估算模型,重点对比了各种模型在无人干扰和人为干扰区土壤盐分预测精度的差异。具体结论如下:

(1) 光谱曲线进行 CR 处理后,吸收带显著增强,尤其可见光范围内 400 ~610 nm 和 610 ~800 nm 波段处的吸收峰被明显放大。而对 FDCR 变换后,无人干扰区的敏感波段主要分布于可见光(400 ~800 nm)范围内,人为干扰区则是可见光 - 近红外波段(800 ~2 400 nm)。

(2) 利用敏感波段建立的模型中,相较于无人干扰区,人为干扰区的 FDCR 模型精度更高,*RPD* 大于 2.5,具有很好的预测土壤含盐量的能力。说明在 CR 的基础上再进行一阶微分处理能提高人为干扰区土壤盐分预测精度。因此,对于土壤盐分变异系数大,人类活动干扰强烈地区的土壤含盐量预测更适合用 FDCR 模型。

(3) 总体上无论有无人为干扰,模型精度是去包络线 6 个吸收特征 > 去包络线敏感波段 > 去包络线 3 个吸收特征 > 单个吸收特征模型。因此,基于去包络线的 6 种吸收特征建立的多元线性模型都是预测精度最高且最稳定的模型,反演效果十分理想,无/有人为干扰区 R^2 分别为 0.92 和 0.86,*RPD* 为 3.06 和 2.93,可极好、很好地预测土壤盐分。而基于 CR 敏感波段的模型除无人为干扰区的 FDCR 外,其余模型 R^2 均大于 0.8,且 *RPD* 大于 2,也对土壤盐分具有较好的预测能力。

参考文献(References):

［1］ Metternicht G I,Zinck J A. Remote sensing of soil salinity:Potentials and constraints［J］. Remote Sensing of Environment,2003,85(1):1 -20.

［2］ 王巧焕,卢玉东,赛佳美,等. 干旱区绿洲土壤盐分特征［J］. 干旱区研究,2018,35(3):503 -509.［Wang Qiaohuan ,Lu Yudong,Sai Jiamei,et al. Characteristics of soil salinity in oasis in arid regions［J］. Arid Zone Research,2018,35(3):503 -509.］

［3］ 刘梅先,杨劲松. 土壤盐分的原位测定方法［J］. 土壤,2011,43(5):688 -697.［Liu Meixian,Yang Jinsong. In-situ determination methods for soil salinity［J］. Soil,2011,43(5):688 -697.］

［4］ 李建国,濮励杰,朱明,等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点［J］. 地理学报,2012,67(9):1 233 -1 245.［Li Jianguo,Pu Lijie,Zhu Ming,et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research［J］. Arid Land Geography,2012,67(9):1 233 -1 245.］

［5］ Abrol I P,Yadav J S P,Massoud F I. Salt-Affected Soils and Their Management［M］. Rome: FAO Soils Bulletin,1988.

［6］ Dehaan R L,Taylor G R. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization［J］. Remote Sensing of Environment,2002,80(3):406 -417.

［7］ Walter C,McBratney A B,Douaoui C A,et al. Spatial prediction of topsoil salinity in the chelif valley,algeria,using local ordinary kriging with local variograms versus whole-area varingram［J］. Austraalian Journal of Soil Research,2001,39(2):259 -272.

［8］ 刘迁迁,苏里坦,刘广明,等. 伊犁河谷察南灌区土壤盐分空间变异研究［J］. 干旱区研究,2017,34(5):980 -985.［Liu Qianqian,Su Litan,Liu Guangming,et al. Spatial variation of soil salinity in the Chanan irrigated avea in the Iili River Valley［J］. Arid

Zone Research,2017,34(5):980－985.〕
〔9〕 王芳芳,吴世新,乔木,等.基于3S技术的新疆耕地盐渍化状况调查与分析〔J〕.干旱区研究,2009,26(3):366－371.〔Wang Fangfang,Wu Shixin,Qiao Mu,et al. Investigation and analysis of Xinjiang salinization status based on 3S technology〔J〕. Arid Zone Research,2009,26(3):366－371.〕
〔10〕 李晓明,韩霁昌,李娟.典型半干旱区土壤盐分高光谱特征反演〔J〕.光谱学与光谱分析,2014,34(4):1 081－1 084.〔Li Xiaoming,Han Jichang,Li Juan. Research on hyperspectral inversion of soil salinity in typical semiarid area〔J〕. Spectroscopy and Spectral Analysis,2014,34(4):1 081－1 084.〕
〔11〕 段鹏程,熊黑钢,李荣荣,等.不同干扰程度的盐渍土与其光谱反射特征定量分析〔J〕.光谱学与光谱分析,2017,37(2):571－576.〔Duan Pengcheng, Xiong Heigang, Li Rongrong. A quantitative anlysis of the reflectance of the saline soil under different disturbance extent〔J〕. Spectroscopy and Spectral Analysis,2017,37(2):571－576.〕
〔12〕 彭杰,迟春明,向红英,等.基于连续统去除法的土壤盐分含量反演研究〔J〕.土壤学报,2014,51(3):459－469.〔Peng Jie,Chi Chunming,Xiang Hongying. Inversion of soil salt content based on continuum removal method〔J〕. Acta Pedologia Sinica,2014,51(3):459－469.〕
〔13〕 庄伟伟,张元明.生物结皮对荒漠草本植物群落结构的影响〔J〕.干旱区研究,2017,34(6):1 338－1 344.〔Zhuang Weiwei,Zhang Yuanming. Effects of biological crust on community structure of desert herbs〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(6):1 338－1 344.〕
〔14〕 王遵亲,祝寿泉,余仁培,等.中国盐渍土〔M〕.北京:科学出版社,1993.〔Wang Zunqin,Zhu Shouquan,Yu Rentei,et al. Chinese Saline Soil〔M〕. Beijing:Science Press,1993.〕
〔15〕 毛海涛,黄庆豪,龙顺江,等.土壤盐渍化治理防护毯的研发及试验〔J〕.农业工程学报,2015,31(17):121－127.〔Mao Haitao,Huang Qinghao,Long Shunjiang,et al. Design and experiment of protective blanket for soil salinization control〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(17):121－127.〕
〔16〕 季耿善,徐彬彬.土壤粘土矿物反射特性及其在土壤学上的应用〔J〕.土壤学报,1987,24(1):67－76.〔Ji Gengshan,Xu Binbin. Reflectance of soil clay minerals and its application in pedology〔J〕. Acta Pedologica Sinica,1987,24(1):67－76.〕
〔17〕 浦瑞良,宫鹏.高光谱遥感及其应用〔M〕.北京:高等教育出版社,2000.〔Pu Ruiliang,Gong Peng. Hyperspectral Remote Sensing and Its Application〔M〕. Beijing:Higher Education Press,2000.〕
〔18〕 Saeys W,Mouazen A M,Ramon H. Potential for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy〔J〕. Biosystem Engineering,2005,91(4):393－402.

Estimation and Comparison of Soil Salinity under Different Intensities of Human Disturbance in Xinjiang

WANG Ning[1], XIONG Hei-gang[2], MA Li-fang[1], YE Hong-yun[1], ZHANG Fang[1]
(1. *College of Resources and Environment Sciences*, *Xinjiang University*, *Urumqi* 830046, *Xinjiang*, *China*;
2. *College of Arts and Science*, *Beijing Union University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Soil spectra under different intensities of human disturbance were used as the data sources to extract the absorption characteristics and sensitive bands by the continuum removal method. Linear regressions were established for estimating soil salinity based on the continuum removal method. The results showed that: ① The continuum removal method could be used to significantly enhance the absorption characteristics of soil spectra in wavelength bands of 400－610 nm and 610－800 nm; ② The correlation between soil salt content in the manned/unmanned disturbance area and the first derivative of the continuum removal (FDCR) was better than continuum removal (CR), the sensitive bands were concentrated in the Vis area in the unattended area (400－800 nm), and the artificially disturbed area was Vis-NIR (400－2 400 nm); ③ Basically, the accuracy of the models for predicting soil salinity in the manned/unmanned disturbance area was in an order of 6 absorption characteristic models of continuum removal > sensitive band model of CR and FDCR > 3 absorption characteristic models of continuum removal > single absorption feature model. The values of R^2 of the best predictive model of the manned/unmanned disturbance regions were 0.86 and 0.92, respectively. The value of the optimal model of relative percent deviation for the unmanned disturbed zone reached 3.06 and higher than 3, which revealed that the model was excellent and stable in predicting soil salinity in this area.

Key words: human disturbance; spectral continuum removal; soil salinity; hyperspectrum; Xinjiang